

УДК 621.92

Н. Ю. КАЛИНИЧЕНКО, С. Е. МАРКОВИЧ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ДЕТАЛЕЙ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПЛАНЕТАРНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Сформулирована проблематика необходимости исследования температурных полей в процессе обработки деталей авиационных двигателей. В работе представлена температурная модель, описывающая процесс глубинного шлифования деталей методом конечных разностей с учётом кинематических особенностей планетарной шлифовальной головки (ПШГ). Получены зависимости, позволяющие определять в любой момент времени процесса обработки: длину мгновенной дуги контакта, температуру заготовки и распределение температурных источников по поверхности контакта. Результаты теоретических исследований разработанной математической модели проверены экспериментальным способом.

Ключевые слова: температурное поле, метод конечных разностей, планетарная шлифовальная головка (ПШГ), планетарное шлифование, детали авиационных двигателей

Введение

Одна из главных проблем, возникающих в процессе шлифования – это управление количеством теплоты, переносимой в заготовку. Особенно эта проблема актуальна для высокоскоростного и глубинного шлифования.

Известно, что в процессе абразивной обработки около 80% энергии, затрачиваемой на шлифование, переходит в тепловую. Данный фактор является одним из доминирующих при формировании поверхностного слоя детали. Автором работы [1] установлено, что при традиционной схеме глубинного шлифования в деталь поступает 33% тепла, выделившегося в зоне шлифования, а в случае использования планетарной схемы – 29%. В работе [2] доказано, что 70% образуемой тепловой энергии поступает в деталь, и 30% в режущий инструмент. Такие различия можно объяснить аналитическим представлением, используемым исследователем в своем математическом аппарате.

Постановка задачи и цель исследования

Большинство современных теоретических исследований имеют существенные ограничения в области их применения по причине введения допущений и ограничений для аналитического описания процессов шлифования. Например, авторами работы [2] выведено теоретическую зависимость распределения температуры на поверхности детали и в подповерхностных слоях для случая глубинного шли-

фования. Но авторами не уточнено, какие именно абразивные зерна выбраны для расчёта (режущие или деформирующие). Так в работе [3] разработана математическая модель изменения температуры по глубине детали при резании прерывистым осциллирующим шлифовальным кругом, однако, данная модель не учитывала тепло, уносимое со стружкой. Также на сегодняшний день не существует аналитических моделей, способных с высокой степенью достоверности учитывать влияние кинематики процесса планетарного шлифования на формирование тепловых полей в зоне резанья. Таким образом, целью данной работы является разработка математической модели, позволяющей рассчитывать температурные поля в зоне резанья при глубинном планетарном шлифовании.

Для достижения указанной цели необходимо решить ряд задач связанных с определением в любой момент времени процесса обработки длины мгновенной дуги контакта, температуры заготовки и распределение температурных источников по поверхности контакта.

Решение проблемы

Разрабатываемая двумерная модель исследования нестационарного температурного поля, образуемого в процессе глубинного шлифования с применением ПШГ, позволит получать в любой момент времени: температуру детали $T(x, y, \tau)$, длину дуги контакта $L_{\text{КОНТ}}^{\text{МГН}}(\tau)$ и глубину прижога $h_{\text{приж}}(\tau)$ (в случае его возникновения). С. Г. Редько [4] предло-

жил метод определения температуры шлифования, суть которого основывается на работе единичных абразивных зёрен шлифовального круга и последовательным наложением элементарных тепловых импульсов от зерен, причем нагрев шлифуемой поверхности является результатом такого многократного наложения. Алгоритм модели представлен на рисунке 1.

Расчёт начинается заданием всех необходимых исходных данных. К ним относятся **геометрические характеристики** режущего инструмента: $R_{\text{ПШГ}}, R_{\text{К}}, B, z, i, L$; **технические характеристики круга**: $z_{\text{к}}, C_{\text{V}}, r$; **кинематические характеристики**: $v_{\text{кр}}, \omega_{\text{кр}}, v_{\text{ПШГ}}, \omega_{\text{ПШГ}}, t_{\text{к}}, L_{\text{КОНТ}}^{\text{МГН}}$; **физические свойства материала круга и заготовки**: $\rho_{\text{з}}, \rho_{\text{св}}, \rho, \lambda_{\text{з}}, \lambda_{\text{св}}, \lambda, c_{\text{з}}, c_{\text{св}}, c$,

$\tau_{\text{р}}, a$; **технологические режимы обработки**: $S_{\text{ПР}}, t$. Затем определяются основные параметры математической модели, которые далее будут использоваться в расчётах: τ – время контакта круга с заготовкой, Δt – расчётный интервал времени, φ – угол контакта круга с деталью, Δh – размер квадратной ячейки, $L_{\text{РХ}}$ – длина рабочего хода инструмента, m – число положений круга, на которые разбивается зона его контакта. Данные параметры будут задействованы в дальнейшем при расчёте температуры в зоне контакта абразивного зерна с поверхностью заготовки, при описании механизма удаления материала шлифовальным кругом и в других модулях разрабатываемой математической модели.

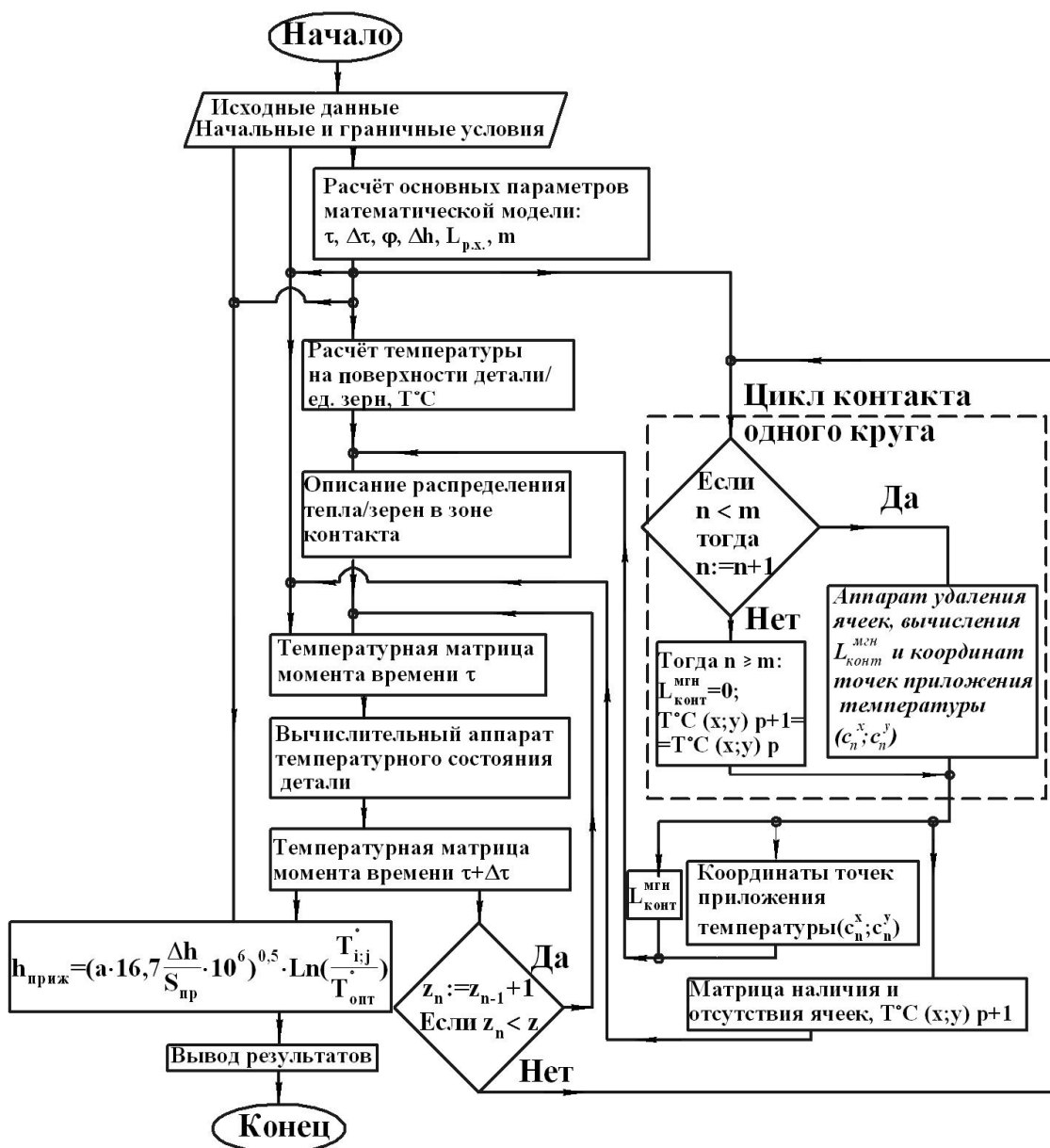


Рис. 1. Алгоритм разрабатываемой тепловой модели

На следующем этапе выполняется расчёт температуры на поверхности контакта абразивного зерна с заготовкой по зависимости [5], адаптированной для процесса глубинного планетарного шлифования:

$$T_m = 0,074 \frac{\tau_p}{(c \cdot \rho)_3} B_{\text{ПШГ}}^{0,05} H^{0,03} U^{-0,02} M^{-0,07} \cdot \Gamma^{-1,22} G^{-0,12} Bi^{-0,15} L_{\text{ПШГ}}^{0,38} F_0^{0,08},$$

где $B_{\text{ПШГ}} = \frac{V_3}{V_K \pm V_\Gamma}$ – относительная скорость шлифования («+» при попутном вращении шлифовального круга с головкой), $H = \frac{t}{R_K}$ – относительная глубина шлифования, $U = c_v R_K^4$ – безразмерный комплекс, характеризующий плотность зерен в переходном слое, c_v – градиент плотности режущих зерен, $M = \frac{z_K}{R_K}$ – безразмерная зернистость круга, z_K – зернистость круга по ГОСТ 3647-80, $\Gamma = \frac{\lambda}{\lambda_3}$ – критерий, характеризующий теплофизические свойства обрабатываемого материала заготовки по отношению к материалу зерна, $G = \frac{\lambda_{св}}{\lambda_3}$ – критерий, характеризующий теплофизические свойства связки круга по отношению к материалу зерна, $Bi = \frac{a}{\lambda_3} Z_K$ – критерий, характеризующий интенсивность теп-

лообмена с окружающей средой, $L_{\text{ПШГ}} = \frac{(V_K \pm V_\Gamma) \cdot z_K}{a}$ – критерий, аналогичный критерию Пекле («+» при попутном вращении шлифовального круга с головкой), $F_0 = a \frac{\sqrt{2R_K \cdot t}}{V_K z_K}$ – критерий Фурье, характеризующий время действия теплового источника.

Параллельно с модулем вычисления температуры T_m включается модуль, описывающий удаление материала с поверхности заготовки за один цикл работы круга ПШГ (рис. 2).

Выходными данными этого модуля являются значения $L_{\text{КОНТ}}^{\text{МГН}}$ – мгновенная длина дуги контакта круга с заготовкой, а также $M = (m_{ij})_{i=1, j=1}^{m, n}$ – матрица наличия и отсутствия ячеек для всех заданных положений круга ПШГ в момент его контакта с заготовкой. Далее эти данные будут необходимы для расчёта количества температурных источников и для описания распределения температуры в подповерхностных слоях обрабатываемой детали.

На следующем этапе производится расчёт количества источников температуры, взаимодействующих в зоне резания с поверхностью детали в исследуемые моменты времени. Для этого необходимо задаться параметрами режущего инструмента: z_K, R_K , а также выполнить расчёты значений расстояния между вершинами зерен и длиной дуги контакта круга с заготовкой.

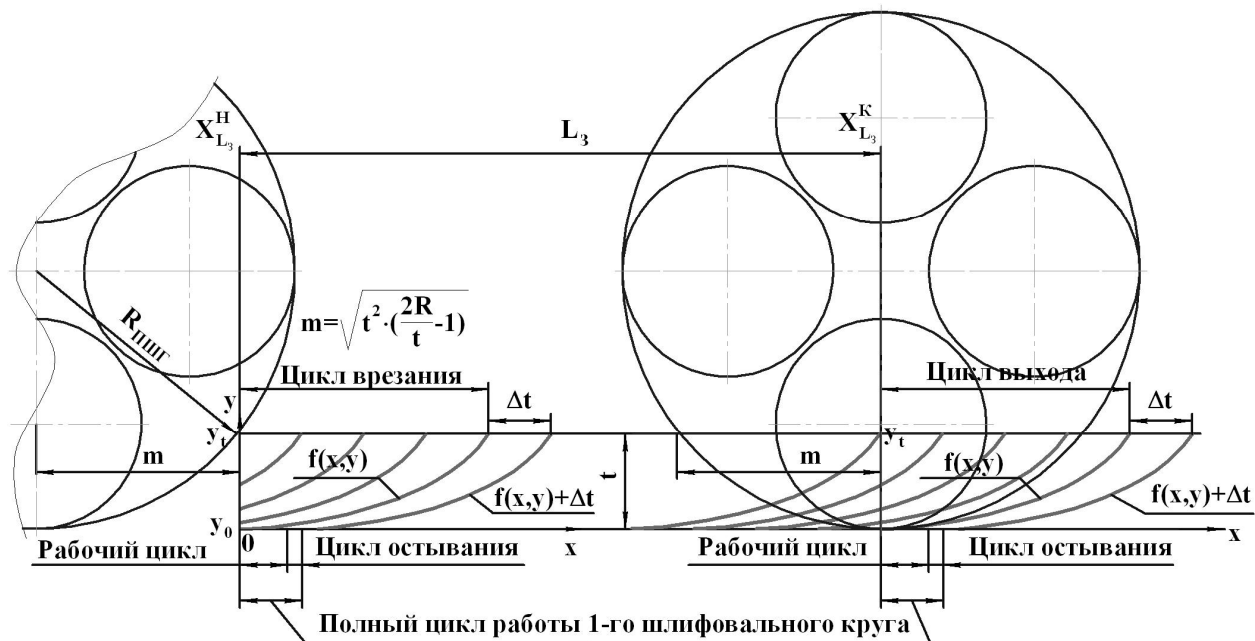


Рис. 2. Циклы обработки детали

Кроме того, на данном этапе производится формирование узловой сетки в исследуемой плоскости распределения температурного поля детали. В нашем исследовании сетка будет иметь квадратные ячейки, т.е. $\Delta x = \Delta y = \Delta h$. Значение величины Δh играет важную роль в ходе решения нестационарной тепловой задачи и влияет на его устойчивость и степень достоверности. В зависимости от расположения узла, критерии устойчивости вычисления его температуры имеют вид (рис. 3), [6]:

- для граничного узла, расположенного на внешнем углу с конвекцией на границе

$$F_0(1 + Bi) \leq \frac{1}{4};$$

- для граничного узла, расположенного на плоскости с конвекцией на границе $F_0(2 + Bi) \leq \frac{1}{2};$

- внутренний узел квадратной ячейки $F_0 \leq \frac{1}{4}.$

Из вышеизложенного следует максимально приближенное к действительности представление характера распределения зерен абразивного круга как источников температуры в зоне контакта его с заготовкой.

На следующем этапе образуется матрица значений температур поверхностного слоя детали в момент времени t . В начальный момент времени значения её ячеек заполняются исходя из начальных и

граничных условий. Затем в процессе работы ПШГ значения матрицы температур начинают изменяться, тем самым образуя температурную матрицу момента времени $t+1$. В результате получаем информацию о температуре в любой точке исследуемой области детали для любого момента времени. Данная информация может быть использована как для выявления критических температур, вызывающих возникновение шлифовочных дефектов, так и для определения глубины их проникновения.

На последнем этапе выводятся результаты работы математического аппарата, и работа модели завершается. Последующий анализ результатов проведенного моделирования позволит оптимизировать режимы обработки деталей из различных материалов с целью достижения большей производительности и при условии избегания образования температурных дефектов.

С целью проверки работоспособности разработанной модели проведен расчёт температуры детали из стали 4Х5МФ1С ($\lambda=22$ Вт/(м·град); $c=0,580$ Дж/(кг·град); $\rho = 7716$ кг/м³), обрабатываемой ПШГ с диаметром кругов 100 мм. Обработка производилась без применения СОЖ, а теплообмен осуществлялся между открытой поверхностью и потоком воздуха, увлекаемого периферией ПШГ: $\lambda_1=0,0257$ Вт/(м·град); $c_1=1004,18$ Дж/(кг·град); $\rho_1 = 1,293$ кг/м³. Режимы обработки: $V_{\text{водила}} = 20$ м/с,

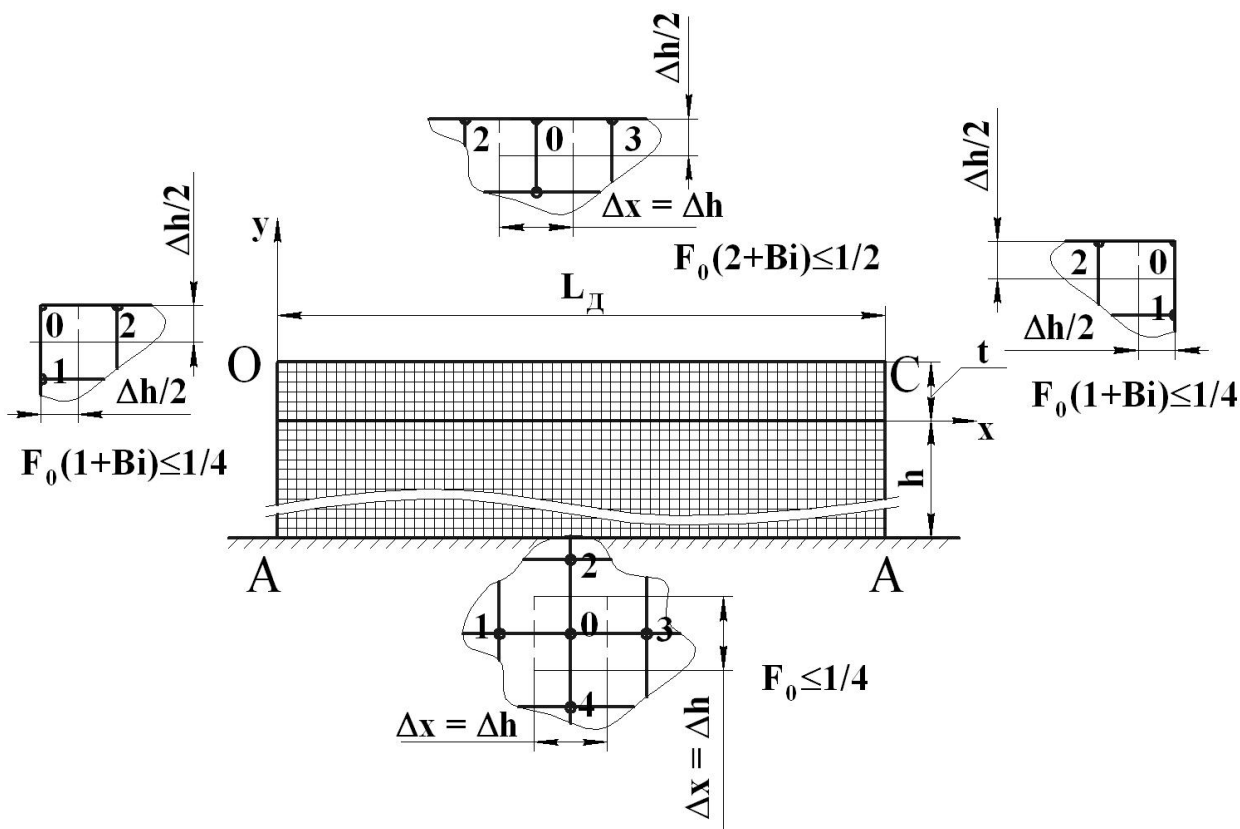


Рис. 3. Разбиение детали на ячейки

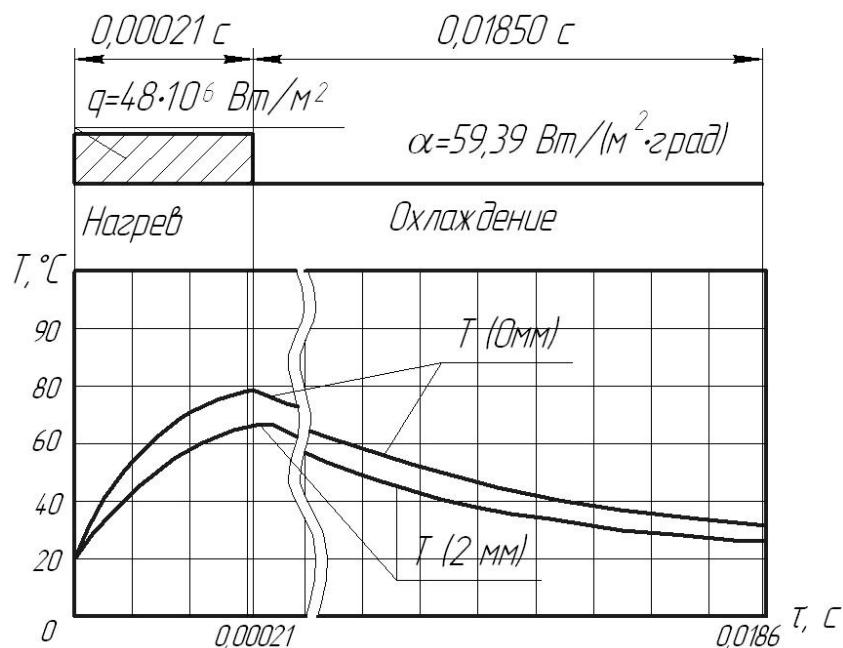


Рис. 4. Изменение температуры шлифования $T^{\circ}\text{C}$ во времени на этапах нагрева (0...0,00021 с) и охлаждения (0...0,0185 с): $T(0\text{ мм})$ – температура на поверхности обрабатываемой детали; $T(2\text{ мм})$ – температура на глубине 2 мм под обрабатываемой поверхностью

$S_{\text{пр}} = 1\text{ мм/с}$, $t = 1,5\text{ мм}$. На рис. 4 видно, что на глубине 2 мм температура продолжает увеличиваться до максимального значения $68,7^{\circ}\text{C}$, даже на этапе охлаждения, а затем уменьшается. Этот факт подтвержден и экспериментальными исследованиями, т.е. температура глубинных слоев материала может превышать температуру вышележащих слоев. Происходит изменение направления теплового потока, которое оказывает значительное влияние на характер структурно-фазовых превращений материала поверхностного слоя.

Заключение

Созданный универсальный математический аппарат позволяет выполнять расчёт полей температур и интенсифицировать процесс обработки деталей АД глубинным шлифованием для случаев использования ПШГ, прерывистого и традиционного (со сплошной поверхностью) шлифовальных кругов, в качестве режущего инструмента, за счёт моделирования теплового процесса для различных режимов обработки. Таким образом отпадает надобность в проведении длительных и дорогостоящих экспериментов с целью выявления наиболее благоприятных и экономически целесообразных режимов обработки.

Данная математическая модель положена в основу разрабатываемой технологической системы, позволяющей в режиме реального времени управлять параметрами качества поверхностного слоя

детали, что особенно актуально при производстве критических деталей авиакосмической техники.

Литература

1. Курин, М. А. Дослідження технології планетарного глибинного шлифування плоских поверхонь деталей авіаційних двигунів [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.07.02; захищена 13.05.11 ; утв. 26.09.011 / Курин Максим Александрович. – Х., 2011. – 179 с.
2. Чирков, Г. В. Использование основных признаков нанотехнологии в технических системах [Текст] / Г. В. Чирков // Технология машиностроения. Сер.: Специальные виды технологий. – 2008. – Вып. № 3. – С. 35 – 43.
3. Исследование и разработка конструкции самоосциллирующего круга с прерывистой режущей поверхностью [Текст] / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский, А. Ю. Пирогов, О. Н. Бутко // Технологии в машиностроении : сб. науч. тр. Национального технического университета "ХПИ". – Вып. 22. – Х., 2008. – С. 85 – 90.
3. Редько, С. Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов [Текст] / С. Г. Редько. – Саратов : Издательство Саратовского университета, 1962. – 231 с.
4. Оптимизация технологии глубинного шлифования [Текст] : производственное издание / С. С. Силин, Б. Н. Леонов, В. А. Хрульков и др. – М. : Машиностроение, 1989. – 120 с.
5. Крейт, Ф. Основы теплопередачи [Текст] : пер. с англ. / Ф. Крейт, У. Блэк. – М. : Мир, 1983. – 512 с.

Поступила в редакцию 10.06.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. каф. «Технология производства двигателей летательных аппаратов» В. Ф. Сорокин, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ТЕПЛОФІЗИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРАХ ДЕТАЛЕЙ ОБРОБЛЮВАНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ПЛАНЕТАРНОГО ШЛІФУВАННЯ

М. Ю. Калініченко, С. Є. Маркович

Сформульовано проблематику необхідності дослідження температурних полів в процесі обробки деталей авіаційних двигунів. В роботі представлена температурна модель, що описує процес глибинного шліфування деталей методом скінчених різниць з урахуванням кінематичних відмінностей планетарної шліфувальної головки (ПШГ). Отримано залежності, що дозволяють визначати у будь-який момент часу процесу обробки: довжину миттєвої дуги контакту, температуру заготовки і розподіл температурних джерел по поверхні контакту. Результати теоретичних досліджень розробленої математичної моделі перевірено за допомогою експерименту.

Ключові слова: температурне поле, метод скінчених різниць, планетарна шліфувальна головка (ПШГ), планетарне шліфування, деталі авіаційних двигунів

THE THERMAL MODEL OF ESTIMATION THERMAL FIELDS BELOW NEAR-SURFACES OF PARTS WHICH MACHINED BY PLANETARY GRINDING TECHNOLOGY

N. Y. Kalinichenko, S. E. Markovich

The range of problems were formulated with regard to the need to study the problems of temperature fields in the processing of aircraft engine parts. At this article were proposed the temperature model describing the process of creep feed grinding parts finite difference method based on kinematical features of planetary grinding head (PGH). The dependencies for defining at any time processing: the instantaneous length of the arc of contact, the temperature of the workpiece and the temperature distribution of sources over the contact surface. The theoretical results of the developed mathematical models have been tested by an experimental method.

Key words: thermal field, finite difference method, the planetary grinding head (PGH), planetary grinding, creep-feed grinding, parts of aircraft engines.

Калініченко Николай Юрьевич – мл. науч. сотр. каф. «Технологии производства двигателей летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Маркович Сергей Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. «Технология производства двигателей летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.